

水下爆炸加密基床引起地基 及水中结构二次振动的试验研究

李世海 燕 琳

郭铁栓

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (国家地震局, 北京 100036)

摘 要 通过工程试验研究, 观测到了水下爆炸引起的地基及水中结构的二次地震波现象, 分析试验结果, 总结了地基及结构振动的规律, 指出二次振动现象与水中爆炸气泡的脉动有关。在已有水下爆炸理论上, 通过引用等效高度的概念, 借助量纲分析给出了计算群药包水下爆炸气泡脉动周期的经验公式。

关键词 加密基床 水下爆炸 二次振动 气泡脉动

STUDY ON SECONDARY VIBRATION OF FOUNDATION AND SUBMERGED STRUCTURES INDUCED BY UNDERWATER EXPLOSION FOR DENSIFYING FOUNDATION BED

Li Shihai Yan Lin

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy Sciences, Beijing 100080)

Guo Tieshuan

(Chinese Seismological Bureau, Beijing 100036)

ABSTRACT By experiments, the phenomena of secondary vibration of foundation and submerged structures induced by underwater explosion were observed. By the analysis of experimental result, the vibration regularity of foundation and submerged structures was summarized. It is pointed out that the secondary vibration phenomena are related to bubble pulse with underwater explosion. Based on present underwater explosion theories, an empirical formula for calculating the bubble pulse period of underwater multi-charge explosion is given by means of the concept of equivalent height and dimensional analysis.

KEY WORDS Densification of foundation bed Underwater explosion
Secondary vibration Bubble pulse

1 引 言

水下爆炸加密抛石、抛砂基床是近年来在我国发展起来的新技术, 它具有施工方法简单、

李世海: 副研究员, 博士。

郭铁栓: 分析预报中心副研究员, 硕士。

进度快、造价低的优点。然而,水下爆炸产生的地震波必然波及相邻的水中或陆上建筑物,由此产生的安全问题直接影响到爆夯新技术的推广和应用。

水下爆炸加密抛石基床通常是在水深不大于 20m 的浅海中进行的。施工时,将多个药包按照一定的布药参数放在水下基床表面或表面上方的水中,在炸药爆炸产生的强动荷载作用下,使松散的抛石体密度提高。爆炸产生的地基振动以波的形式传播,引起远区建、构筑物的振动。水下爆炸施工中群药包群爆炸产生的地基振动与岩土中爆炸有很大的区别,而在水下爆炸方面的研究,早期研究主要以军事为目的,更注重水中冲击波或气泡脉动对金属结构的作用,理论研究也限于单个药包爆炸的问题。Cole(1948)总结了深水中爆炸有刚性边界和自由边界的研究工作;李世海等(1992)用变分法研究了浅水中的爆炸高压气泡与流体的相互作用问题;李玉民(1996)通过求解常微分方程计算了气泡的脉动周期。但是,已有的理论和试验结果还不能说明药包接触松散体边界和多药包爆炸问题。

本文通过工程试验研究,观测到了水下爆炸引起的水下爆炸引起的水中结构有二次振动的现象,总结了地基及结构振动的规律。指出产生二次振动的原因与水中爆炸高压气泡的脉动有关,提出等效高度的概念,并用于简化处理爆炸过程中波后流场与松散体的相互作用的复杂力学过程,在量纲分析的基础上给出了计算群药包水下爆炸高压气泡脉动周期的经验公式。

2 试验条件、试验装置及测量方法

2.1 试验条件

爆炸试验是结合南方某电厂煤码头基床爆夯工程进行的。水下基床中心线距离后方厂区回填陆域边缘 100m,爆炸区距左侧在建 9 号泊位的最近距离 190m、距左后方库房约 250m。试验区地质条件主要分为两类,土层由下而上为:① 强风化岩、黄色原状中、粗砂 0 ~ 4m,抛石层 8m;② 强风化岩、灰色粘土和黄色粗砂 2.5 ~ 5.0m,抛砂层 4m,抛石层 8m。

强风化岩纵波波速为 2500m/s,抛石层顶面为基床顶面,8m 基床分层爆夯,下层爆夯石层层面标高为 -18.0m(珠江理论高程,以下同),上层为 -14.0m。爆炸时水位高程一般为 1 ~ 3m。9 号泊位结构形式采用 $\Phi 6\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 预应力混凝土钢绞线管桩、宽度为 38m 的宽承台高桩码头,码头护坡比为 1:1.5 的抛石棱体。坡顶浇注混凝土墙(即护岸),坡底标高为 -17.10m,下卧层为 3 ~ 4m 的粘土层。距离爆区 250m 处的库房的基础为经过强夯后的堆填石体,石层下面为 2 ~ 3m 的淤泥层。

2.2 试验装置及测量方法

振动监测点分别设置在 9 号泊位顶板、护岸混凝土墙顶端和库房底板上。爆炸时,药包放在石层表面,即触地爆炸。群药包试验药包按 5m × 5m 或 5m × 4m 网格布置,药包之间用导爆索联接。

首先将拾振器放置在规定的测点处,当爆炸引起的地震波到达时,拾振器将振动信号转化为电信号,通过前置放大器将信号放大。按照测量物理量的要求,对放大信号进行处理(作线性、微分、积分变换)。多道数字采集仪将信号数字化并储存。最后由计算机分析、处理数据,绘图仪画图(见图 1)。

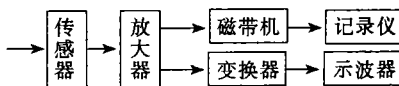


图 1 振动速度测量原理图

Fig.1 Block diagram of vibration velocity recording unit

3 试验结果分析

3.1 试验现象及其分析

图2是试验中测到的一组振动波形(图中幅值为参考值)。从中可见,炸药爆炸引起地基振动,首先到达的振动波波幅值升到最大后逐渐衰减,直至为零或接近于零,第1次振动结束。静止状态持续一段时间后,地基再次振动,振动幅值由小到大,然后衰减。爆炸产生的这种二次振动波,引起人们的关注。分析振动波形有如下特点:

(1)在一次爆炸中,第二波形(简称后波)与第一波形(前波)的位相相同,形状也相似(图2)。

(2)在爆源到测点距离及布药形式相同的情况下,前、后波的时间间隔不同,其时间差随着药量的增加而增大(图2a、b、c)。

(3)同一次爆炸,不同观测点观测到的前后两次波形的时间间隔基本相同(图2d、e)。

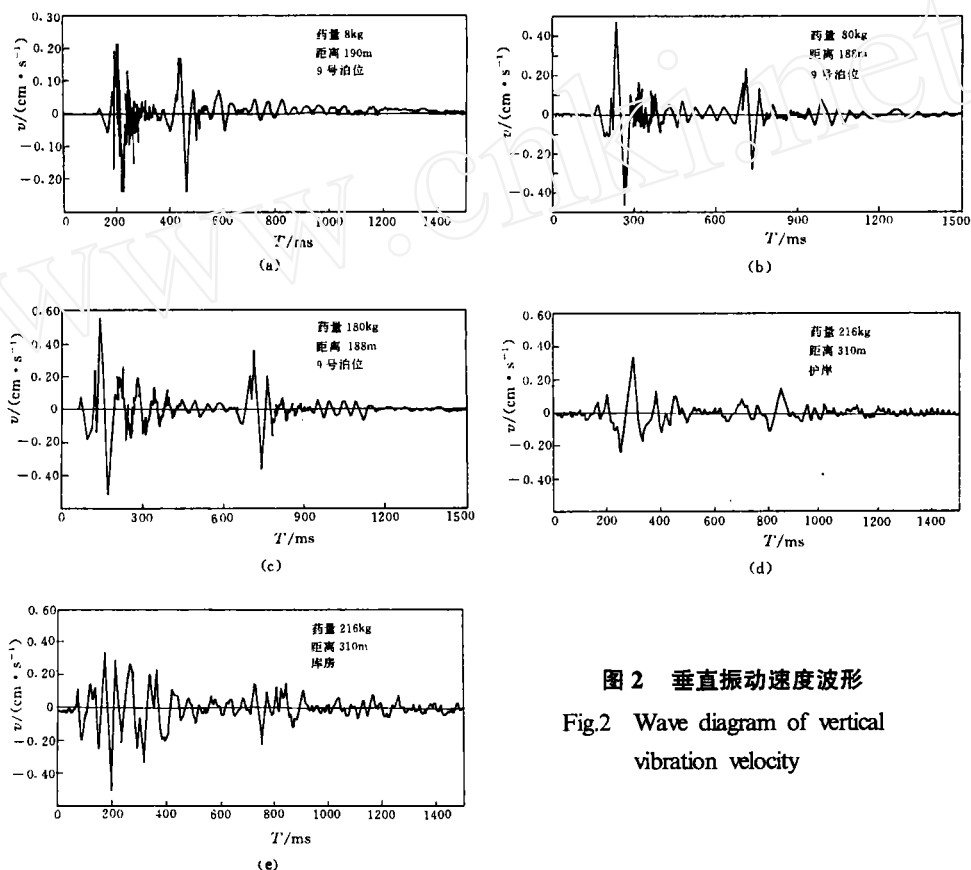


图2 垂直振动速度波形

Fig.2 Wave diagram of vertical vibration velocity

(4)前、后波幅值的大小接近。

根据水下爆炸理论,炸药爆炸产生大量的气体形成由水包围的高压气团,通常称为高压气泡。高压气泡压缩周围的流体,在水中形成压力波,以每秒约1500m的速度传播(爆源附近冲击波的速度更高些)。同时,高压气泡作用于基床引起地基振动,形成沿地基传播的地震波。这样,爆炸荷载主要以两种波的形式直接或间接地作用于测点基础或结构,即水中压力波和地

震波。

分析试验得到的波形特点,根据冲击波和地震波的传播规律,可以判断,测点的两次波形不是直达波与反射波或折射波分别到达作用于结构的结果,也不是冲击波和地震波因为波速不同到达测点的时间不同的结果。事实上,按照波的传播规律,水中压力波和地震波的传播速度基本不变,则推出:①在测点到爆源距离相同的情况下,两种波到达的时间差应基本上保持不变,即不应随药量的变化而改变;②对相同的药量,当测点到爆源的距离不同时,波到达的时间差应当是不同的。推论①、②与试验观测到的规律不符合。试验结果表明两次波的时间差主要与药量有关,因此研究气泡的脉动是解释两次波形现象的主要途径。另外,振动波幅的大小与爆炸荷载作用于地基的冲量大小有关,试验现象(4)表明,爆炸后第一次气泡膨胀与二次脉动对地基产生的冲量具有相同的量级,鉴于松散石体上触地爆炸药包附近散体孔隙水压力及运动流体与散体相互作用的复杂性,对此本文将不作定量的理论分析。

3.2 水下爆炸加密基床气泡脉动问题的量纲分析与等效高度

首先引入等效高度的概念。在工程问题中,基床作为松散介质可以认为是由松散石块和水组成的。基床表面的炸药爆炸后,爆炸冲击波、波后流场和爆炸气体产物与两相介质相互作用构成了复杂的力学问题,目前还很难有一种有效的方法给出定量的描述。为了从工程角度说明问题,我们假设存在着一个边界,在这个边界上,流体的垂直运动速度基本为零。对气泡脉动的影响,它起着刚性底板的作用,即气泡膨胀时增加水的阻力,气泡收缩时降低水的回流速度。该边界处在药包的下方,我们把药包到该边界的距离称为等效高度(或挂高)。等效高度类似于 Cole 所述的药包到刚性底板的距离,但是它所反映的是药包爆炸在松散体内部产生水流的影响深度。

在布药形式、抛石基床块石的尺度、密度及松散体的孔隙率基本不变的情况下,可选取如下主定参量:

$$Q, Q_0, Q_c, g, d, z_0, B_1, B_2, \rho, e \quad (1)$$

其中, Q 、 Q_0 分别为群药包总药量和单个药包药量, kg; Q_c 为炸药爆热, J/kg; g 为重力加速度, m/s^2 ; d 为药包处的水深, m; z_0 为药包处的压力水头, m; B_1 、 B_2 分别是药包间距和排距, m; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; e 为松散石层的孔隙率。

引入深水中爆炸的特征长度和特征时间:

$$L_0 = \left(\frac{3\alpha Q_c Q_0}{4\pi\rho z_0} \right)^{\frac{1}{3}}, T_{c0} = \left(\frac{3}{2gz_0} \right)^{\frac{1}{2}} L_0, L = \left(\frac{3\alpha Q_c Q}{4\pi\rho z_0} \right)^{\frac{1}{3}}, T_c = \left(\frac{3}{2gz_0} \right)^{\frac{1}{2}} L \quad (2)$$

其中 $\alpha = 0.5$ 表示炸药能量的 50% 用于推动流体运动。

$$\text{给出无量纲量: } \frac{d}{L} \left(\frac{d}{L_0} \right), \frac{d}{z_0}, \frac{Q_0}{Q}, \frac{Q_c}{\rho z_0}, \left(\frac{B_1}{L_0}, \frac{B_1}{B_2} \right), e$$

上式括号内的量只在群药包试验内考虑。取 T 为气泡脉动周期, 则有如下的无量纲关系式:

$$T/T_c = f(d/L, d/z_0, Q_0/Q, Q_c/\rho z_0, B_1/L_0, B_1/B_2, e) \quad (3)$$

考虑到水深在 20m 左右变化对 d/z_0 、 $Q_c/\rho z_0$ 的影响不大, 孔隙率 e 基本不变, B_1/L_0 、 B_1/B_2 通常设计为常数; 并考虑到单药包试验, $Q_0/Q = 1$ 、 $L = L_0$ 、 $T_c = T_{c0}$, 则关系式(3)化为:

$$T/T_{c0} = f(d/L_0) \quad (4a)$$

$$\text{同样, 对等效深度 } h^*, \text{ 有 } h^*/L_0 = f^0(d/L_0) \quad (4b)$$

由(4a)、(4b)可得:
$$T/T_{c0} = f^1(h^*/L_0) \quad (4c)$$

式(4)是用于水下爆炸加密基床单药包试验的量纲关系式。

Friedman(Cole,1948)采用映像法并通过水下爆炸试验总结出了水下爆炸气泡脉动的计算公式:

$$\frac{T}{T_{c0}} = 1.485 \left(1 + \frac{0.189F(x)}{h/L_0} \right) \quad (5)$$

其中, $F(x) = (1-x) \left[2x \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 - x^2} - \ln 2 \right]$; $x = \frac{d-h}{d+h} = \frac{1-h/d}{1+h/d}$; h 为药包高度。

借助公式(5)探索式(4c)的具体表达式,将药包高度 h 由等效高度 h^* 代替,得到:

$$\frac{T}{T_{c0}} = 1.485 \left(1 + \frac{0.189F(x^*)}{h^*/L_0} \right) \quad (6)$$

其中, $F(x^*) = (1-x^*) \left[2x^* \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 - x^{*2}} - \ln 2 \right]$; $x^* = \frac{d-h^*}{d+h^*}$

严格地讲,(6)式是不能与(5)式相提并论的,因为(6)式的理论基础不适于(5)所讨论的问题。由于我们引用了等效高度,使得(6)和(5)式有了相同的表达形式,并以此讨论 h^* 和 h 不同的物理意义和两式不同的应用范围。

在关系式(6)中, d 、 L_0 都是已知的, Q_c 为试验采用乳化炸药的爆热 $3.38 \times 10^6 \text{J/kg}$ (取 TNT 的 81%,熊代余 1993), T 可以从试验给出的振动波形图上得到,将有关数据代入方程(6)后,可以求出不同药量和水深情况下的 h^* 值。取无量纲量 h^*/L_0 为常数 C ,给出了单药包试验一组整理结果如下:

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	平均
药量/kg	8	20	8	20	8	20	8	20	
周期/ms	243.4	328.0	240.0	325.0	246.0	330.0	246.0	329.0	
C	2.53	2.28	2.98	2.57	2.07	2.11	2.07	2.16	2.35

由上表可以看出,尽管药量差别较大,图上测量也有一定的误差,但 C 值的变化并不大,其平均值为 2.35。由此给出计算等效高度的计算公式:

$$h^* = C(3\alpha Q_c Q_0 / 4\pi \rho z_0)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

公式(7)表明, $C = h^*/L_0$ 值并不随着脉动周期和药量的改变而变化,等效深度与特征长度成正比,而不单纯是几何参数。当药量增大或水深减小时,等效高度增大,这与等效高度的物理意义是一致的。如同粘性流体力学中的边界层与远处流体速度有关一样,等效高度与石层表面爆炸荷载的强度有关。从这种意义上讲,等效高度是度量爆炸引起流体与石块相互作用深度的物理量。正是引入了这一物理量,使得公式(6)和公式(5)有了本质的区别。公式(7)为研究群药包爆炸问题奠定了基础。

3.3 群药包爆炸二次脉动周期的计算公式

依照单药包试验给出了确定 h^* 的方法,可以通过关系式(4)研究群药包爆炸问题。在爆炸加密工程中,一般采用群药包爆炸,药包间距是 L_0 的 2~3 倍,每排布置 4 个药包以上,使得一次起爆总药量的作用范围远大于单药包作用的等效深度。另外,药包之间爆炸气体的贯通是在气泡压力远低于静水压力时发生的,因此可以认为,在现有条件下群药包爆炸等效高度主要取决于单个药包的药量。

研究群药包问题,须考虑 Q_0/Q 的影响,为简化起见,给出如下的量纲公式:

$$\frac{T}{T_c} = 1.485 \left(1 + \frac{0.189F(x^*)}{h^*/L} \right) g \left(\frac{Q_0}{Q} \right) \quad (8)$$

将试验结果代入(8)式,可以得到函数 $g(Q_0/Q)$ 同 Q_0/Q 的关系,计算参数见表1。

根据表1中的数据画图,可以直观地看出函数 $g(Q_0/Q)$ 具有指数函数的形式。

$$\text{取 } g(Q_0/Q) = K(Q_0/Q)^\beta \quad (9)$$

函数拟合试验数据,得 $K=1.0$, $\beta=0.16$ 。

将(9)式和 K 、 β 值代入(8)式得到计算群药包爆炸加密基床高压气泡脉动周期的公式:

$$T = 1.485 \left(\frac{3}{2gz_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{3\alpha Q_0 Q}{4\pi\rho z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 + \frac{0.189F(x^*)}{C} \left(\frac{Q_0}{Q} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{Q_0}{Q} \right)^{0.16} \quad (10)$$

$$\text{其中, } F(x^*) = (1-x^*) \left[2x^* \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 - x^{*2}} - \ln 2 \right]$$

$$x^* = \frac{d-h^*}{d+h^*}, \quad h^* = C \left(\frac{3\alpha Q_0 Q}{4\pi\rho z_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad C=2.35$$

将公式(10)计算的结果与试验得到的两次波到达的时间间隔比较(见图3),可以看出两种结果吻合较好。说明量纲分析中借用 Friedman 公式和式(9)的函数形式是可取的。

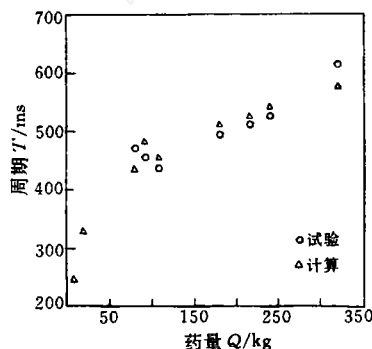


图3 公式(10)与试验结果比较

Fig.3 Comparison of the result calculated by Formula(10) with experiment result

应当说明,公式(10)是在现有条件下总结出来的,未考虑布药范围长、宽尺度变化的影响,也没有改变布药间距、排距的试验结果(如果间距大于5倍 L_0 ,就应作为两个独立药包爆炸问题)。在实际工程中,通常这些参数不会有大的改变,所以公式(10)在工程中是非常实用的。

4 结 论

(1)水下爆炸加密基床可以引起水中结构物以及附近陆域建筑物基础的二次振动。

(2)产生二次振动的主要原因在于水下爆炸高压气泡的二次脉动。

(3)用等效高度的概念简化爆炸过程中松散石体与气体、水流动相互作用的力学过程,以此讨论水下爆炸加密松散体的气泡的脉动问题是简便可行的。

(4)借助于量纲分析得到的群药包爆炸脉动周期的计算公式对研究水下爆炸加密抛石基床引起的地基振动问题是非常有用的。

(5)公式(10)有待于通过更多的试验结果验证、完善。

(下转第4页)

表1 群药包试验计算周期与函数 $g(Q_0/Q)$ 值

Table 1 Calculated period and function $g(Q_0/Q)$ value on multi-charge explosion experiments

Q	Q_0	d	T	Q_0/Q	$g(Q_0/Q)$
8	8	20	244	1.0	1.0
20	20	20	328	1.0	1.0
80	20	20	471	0.25	0.89
92	15.3	16	455	0.167	0.73
108	18	20	437	0.167	0.74
180	20	20	495	0.111	0.70
216	18	20	513	0.083	0.68
240	20	20	528	0.083	0.68
320	20	20	614	0.0625	0.71

表 1 爆破切口圆心角计算值与实际值的对比

Table 1 Comparison of calculated data with actual data of central angle of blasting gap of chimney

烟囱 编号	外半径 /m	壁厚 /m	高度 /m	质量 $\times 10^3/\text{kg}$	爆破切口圆心角/(°)	
					实际值	计算值
1	2.65	0.76	45.0	7.55	196	155
2	2.71	0.62	35.0	5.00	224	166
3	1.80	0.62	35.0	2.25	212	172
4	2.01	0.49	17.6	1.20	214	197
5	2.70	0.50	35.0	4.50	224	165
6	1.85	0.60	45.0	2.80	225	166
7	1.50	0.75	45.0	2.50	206	161
8	2.16	0.26	20.0	2.40	207	162
9	2.25	0.40	15.0	1.80	216	183

烟囱 编号	外半径 /m	壁厚 /m	高度 /m	质量 $\times 10^3/\text{kg}$	爆破切口圆心角/(°)	
					实际值	计算值
10	2.54	0.49	34.0	7.00	220	149
11	1.75	0.49	35.0	2.00	210	171
12	2.71	0.49	23.0	5.39	216	159
13	1.84	0.54	40.0	2.49	210	167
14	1.95	1.00	28.0	2.70	198	178
15	1.50	0.37	33.0	1.50	208	168
16	2.70	0.49	35.0	4.50	225	165
17	1.70	0.37	25.0	1.50	196	174

表中个别烟囱质量为估计值, $(\sigma_c)=1.5\text{MPa}$ 。

表 2 爆破切口圆心角实际值⁽⁵⁾

Table 2 Actual data of central angle of blasting gap of chimney

烟囱 编号	外半径 /m	壁厚 /m	高度 /m	爆破切口 圆心角/(°)
1	1.75	0.50	35	164
2	1.75	0.62	23	177
3	1.86	0.62	45	166
4	1.90	0.59	32	169
5	2.18	0.74	50	189
6	2.75	0.95	42	200
7	2.10	1.00	57	180
8	0.90	0.16	27	121

大多数情况下小于 180° 。

(4) 统计资料表明, 实际工程中砖烟囱爆破切口圆心角大多数在 $200 \sim 220^\circ$ 之间, 其结果是留作起支撑作用的部分在爆破切口形成瞬间致压垮, 由于各个方向下坐不均匀, 导致倾倒方向的改变。本文推荐比较保守的爆破切口圆心角为 180° 。

(5) 本文所计算的结果与文献(5)实际爆破砖烟囱所采用的爆破切口圆心角基本一致。

参 考 文 献

- 1 黄海昌. 爆破(拆除爆破专辑(上)), 1993, (10): 41~43
- 2 李晓阳. 爆破(拆除爆破专辑(下)), 1993, (10): 77~79
- 3 齐世福. 爆炸与冲击, 1989, 9 (4): 318~323
- 4 朱振海. 爆破(拆除爆破专辑(上)), 1993, (10): 105~109
- 5 何广沂. 拆除爆破新技术. 北京: 中国铁道出版社, 1988

(收稿时间: 1997-06-02)

(上接第 20 页)

参 考 文 献

- 1 Cole R H. Underwater Explosion. Princeton University Press. 1948
- 2 李世海, 郑哲敏. Proceedings of international symposium on intense dynamic loading and effects. Chengdu: Sichuan University Press, June 9-12, 1992, 561~564
- 3 李玉民. 水中爆炸气泡脉动流场的数值计算. 爆炸与冲击, 1996, 16(4): 376~381
- 4 熊代余. 水下爆炸测试炸药能量方法的试验与研究. 工程爆破文集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993, 240~245

(收稿时间: 1998-08-10)